

ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМИ ВИПРОБУВАНЬ ЛІСОВОЇ ТЕХНІКИ, ЯКА ЕКСПЛУАТУВАТИМЕТЬСЯ НА ТЕРИТОРІЇ З УХИЛОМ: СТІЙКІСТЬ ТА ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

О. Мачуга, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
Національний лісотехнічний університет України,
Я. Сало,
Я. Ценюх,
Львівська філія УкрНДІПВТ ім.Л.Погорілого

Експлуатація сучасної лісової техніки, яка призначена для територій з ухилом, потребує визначення меж допустимої експлуатації. Це зумовлено наявністю асиметрично розташованого робочого органу – стріли (маніпулятора зі зрубуванням стовбура) та виконання ним технологічних операцій у процесі руху висхідною лінією лісосіки з ухилом.

Представлено теоретичні результати щодо визначення тягових характеристик та опорних реакцій таких самохідних лісових машин, подано графічні залежності таких характеристик від параметрів машин та умов їх експлуатації. Визначено умови безпечної роботи харвестерів. Окреслено засоби щодо лабораторних та стендових випробувань розгляданої лісової техніки стосовно лісосік із ухилом, зокрема – умови стійкості.

Ключові слова: *лісогосподарська техніка, стійкість техніки на схилах, безпека роботи.*

Вступ. Постановка проблеми. Механізація лісогосподарських робіт є надзвичайно гострою проблемою для нашої держави [1]. У ряді країн Центральної Європи, Скандинавських країнах, у Канаді та США ця проблема вирішується зокрема шляхом використання багатофункційних лісозаготівельних комплексів – харвестерів та форвардерів [2] (див. рис. 1).

Використання такого підходу в Україні утруднюється рядом причин. Насамперед – висока вартість таких комплексів за відсутності вітчизняних аналогів. Далі – невисока транспортна доступність наших лісових масивів [3]. Крім того – значна частина лісового фонду України знаходиться в Карпатському регіоні, де практично усі лісосіки розташовані на територіях із ухилом до горизонту. Цей фактор викликає ряд додаткових застережень щодо експлуатації харвестерів та аналогічних машин і механізмів.

Виконання операцій лісозаготівельних комбайнів відбувається протягом руху механізму лісосікою. В гірських місцевостях харвестер може рухатись висхідними траєкторіями. Це потребує оснащення такої техніки двигунами більшої потужності, порівняно з машинами для рівнинних умов роботи.



а



б

Рисунок 1 – Зарубіжна лісозаготівельна техніка: а - харвестер фірми *John Deere*, б – форвадер фірми *Ponsse*

Теоретичні розрахунки тягових характеристик таких самохідних лісових машин [4] потрібно апробувати під час експлуатаційних випробувань в натурних умовах та на спеціалізованих стендах.

Експлуатація харвестерів пов'язується з нерівномірністю навантаження рушіїв правого та лівого бортів, що зумовлюється наявністю асиметрично розташованого націпного технологічного обладнання – стріли (маніпулятора із харвестерною чи процесорною головкою), яка може утримувати чи опрацьовувати стовбур зрізаного дерева. Така асиметрія посилюється на лісосіках з ухилом, що може призвести до непередбаченої втрати самохідної лісової машини внаслідок перекидання чи поздовжнього або поперечного ковзання рушіїв по опорній поверхні. Отже всебічна перевірка теоретичних результатів щодо тягових характеристик та показників стійкості експлуатованих у гірських умовах харвестерів і форвадерів на спеціалізованих стендах із розробленням відповідної програми випробувань є актуальним та важливим народногосподарським завданням.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо колісний харвестер, який рухається площиною з ухилом α до горизонту зі швидкістю v уздовж осі, яка утворює кут β з висхідною лінією площини руху. Зрізання дерев виконується стрілою (маніпулятором з харвестерною/процесорною головкою). Напрямок стріли відведено від напрямку руху на кут γ (рис. 2).

Уведемо декартову систему координат $Oxyz$ з горизонтальною площиною xOy , та віссю z перпендикулярною до неї. Осі $x_1 y_1 z_1$ утворюються повертанням осей xyz на кут α навколо Ox , координатна площина x_1Oy_1 збігається з площиною руху харвестера, вісь z_1 утворює кут α з віссю z . Осі координат $x_2 y_2 z_2$ утворюються шляхом повороту осей $x_1 y_1 z_1$ на кут β навколо Oz_1 так, що координатна площина x_2Oy_2 збігається з площиною руху, а напрям руху розгляданого механізму співвісний з y_2 .

Наслідуючи метод [5], уведемо нормальні складові реакції ґрунту на

рушіїв R_i , ($i = 1 \div 4$), прикладені до центрів контактних ділянок рушіїв уздовж нормалі до поверхні руху механізму та T_i , ($i = 1 \div 4$) тангенційні (дотичні) складові цих реакцій. F_{ki} , ($i = 1 \div 4$) – колові сили на тягові колеса, прикладені уздовж напрямку руху. Вважаємо усі колеса тяговими, а точку прикладання сил – у центрі мас контактних ділянок рушія з ґрунтом. M_{fi} , ($i = 1 \div 4$) – моменти опору коченню коліс. G_T – сила ваги механізму (без урахування ваги стріли та харвестерної головки), прикладена у його центрі мас, направлена вертикально вниз. Сила G_T має складові: нормальну до площини руху силу $G_T \cdot \cos \alpha$ та дотичну складову в площині x_2Oy_2 . Розглянемо двосекційний шарнірний маніпулятор. Довжини секцій L_{M1} та L_{M2} , сили ваги – G_{M1} та G_{M2} , прикладені вертикально вниз у центрах мас, які знаходяться на висоті від площини колових осей відповідно – h_{M1} та h_{M2} . Сила ваги головки G_H , прикладена у її центрі мас на висоті h_H від поверхні руху, 2φ – кут розкриття маніпулятора. Для телескопічної стріли – маніпулятора викладки є аналогічні в припущенні $\varphi=90^\circ$. Силами інерції та чолового опору потоку повітря нехтуємо.

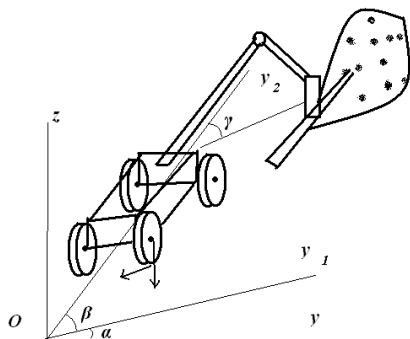


Рисунок 2 – Схема руху харвестера територією з ухилом

Рух харвестера лісосікою в гірській місцевості може супроводжуватись одночасним виконанням ним окремих технологічних операцій, які пропонується згрупувати так: А – захоплення стовбура, Б – зрізання дерева, В – падіння дерева, Г – первинне оброблення стовбура. На всіх етапах виконується ряд допоміжних операцій, зокрема робота механізму стабілізації положення платформи кабіни тощо. Результати тягових розрахунків харвестера з одночасним виконанням ним технологічних операцій представлено в роботі [6].

Задача полягає у визначення нормальних і дотичних реакцій опорної поверхні (ґрунту) від дискретної дії рушіїв харвестера, який рухається гірською лісосікою й одночасно виконує операції виробничої функції.

Нормальні складові опорних реакцій визначаються з рівнянь рівноваги

просторової системи сил, перпендикулярних до напрямку руху харвестера лісосікою. Ці сили (нормальні складові реакцій, проекції сил ваги складових харвестера на нормаль до напрямку руху тощо) утворюють паралельну систему, для якої слід застосувати одне рівняння рівноваги сил уздовж лінії спільного напрямку дії (вісь z на рисунку 2) та два рівняння рівноваги моментів відносно осей, які перетинаються. Для тривісного харвестера кількість невідомих нормальних реакцій – 4, тому ця система сил є статично невизначеною.

Вважатимемо, що у складеному (транспортному) положенні маніпулятора харвестера, який рухається горизонтальною площиною, центр ваги механізму знаходиться у такій точці, що всі нормальні реакції опорної поверхні (ґрунту) – рівні між собою:

$$R = \frac{1}{6}(G_T + G_{M1} + G_{M2} + G_r), \quad (1)$$

де R – середнє значення опорної реакції на одне колесо.

Для складання рівняння рівноваги розгляданої системи сил слід виконати ряд громіздких геометричних побудов, які тут випущено. Рівняння рівноваги моментів відносно осі, яка проходить через центри мас контактних ділянок рушіїв з ґрунтом має вигляд:

$$\begin{aligned} & \left[G_T \frac{b}{2} + G_{M1} \frac{b - l_{M1}^{np}}{2} + G_{M2} \frac{b - 2 \cdot l_{M1}^{np} - l_{M2}^{np}}{2} + G_r \left(\frac{b}{2} - l_{M1}^{np} - l_{M2}^{np} \right) \right] \cdot \cos \alpha - \\ & - (R_4 + R_5 + R_6) \cdot b + \\ & + (G_T \cdot (h_c + r) + G_{M1} \cdot (h_{M1} + r) + G_{M2} \cdot (h_{M2} + r) + G_r \cdot r) \cdot \sin \xi = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

у припущенні, що центр мас харвестерної головки знаходиться на рівні колової осі, r – радіус рушії цієї колової осі.

Для побудови рівняння рівноваги моментів відносно колової осі рушіїв $i=1;4$, щоб спростити викладки, вважається, що стріла харвестера змонтована на осі рушіїв $i=1;4$, центр мас харвестера знаходиться над віссю рушіїв $i=2;3$, база харвестера a , відстань між осями рушіїв $i=1;4$ та $i=2;3$ рівна a_2 . Отже:

$$\begin{aligned} & \sin \theta (G_T \cdot h_c + G_{M1} \cdot h_{M1} + G_{M2} \cdot h_{M2}) - a_2 (R_2 + R_5) - a (R_3 + R_4) + \sum_{i=1}^6 T_i \cdot r \cos \beta + \\ & + \left[G_T \cdot a_2 - \left[G_{M1} \cdot \frac{L_{M1}}{2} + G_{M2} \left(L_{M1} + \frac{L_{M2}}{2} \right) + G_r (L_{M1} + L_{M2}) \right] \sin \varphi \cos \gamma \right] \cos \alpha + \\ & + \sum_{i=1}^6 T_i \cdot r \cos \beta = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\sum_{i=1}^4 T_i$ – сума тангенційних складових реакцій опорної поверхні (ґрунту),

яка визначається із рівняння рівноваги проекцій діючих сил на вісь Oy_1 :

$$\sum_{i=1}^4 T_i = (G_T + G_{M1} + G_{M2} + G_{\bar{A}}) \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Система рівнянь (2), (3), (4) побудована для визначення нормальних складових реакцій опорної поверхні – ґрунту для харвестера в робочому положенні. Аналогічна система рівнянь може бути записана для опорних реакцій у випадку утримання харвестером натягнутого або зрубаного стовбура заміною ваги харвестерної головки на суму ваги головки та стовбура:

$$G_{\Gamma} \Rightarrow G_{\Gamma} + G_{CT}. \quad (5)$$

Дотичні (тангенційні) складові реакцій опорної поверхні визначаються двома рівняннями рівноваги – проекцій діючих сил на вісь Oy_1 (4) та моментів сил у площині x_1Oy_1 відносно будь-якого центра.

Інженерні методи розв'язування побудованої вище системи рівнянь для конкретних прикладів машин та практичне використання отриманих результатів базуються на розгляданні реакції найбільш завантаженого рушія R_1 і її безрозмірного значення R_1^0 , віднесеного до цієї ж реакції у нейтральному положенні на ухилі. Деякі результати наведено нижче. Для харвестера зі зрізаним стовбуром, затисненим у головці

$$R_1 = \cos \alpha \frac{G_T + G_{M1} + G_{M2} + G_{\Gamma} + G_{CT}}{6} + 2 \frac{G_{\Gamma} + G_{CT}}{b} (L_{M1} + L_{M2}) \sin \gamma \cos \alpha, \quad (6)$$

Для безрозмірної величини R_1^0 , у випадку окремих типів харвестерів зі стовбуром, діаметр якого на висоті зрізу 62,5 см, отримано: $R_1^0 = 1 + 8,207 \cdot \sin \gamma$, залежність реакції R_1^0 від кута γ для деяких харвестерів подано на рисунку 3.

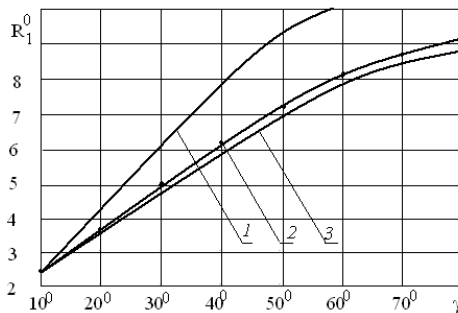


Рисунок 3 – Залежність безрозмірної реакції R_1^0 від положення маніпулятора: 1 - Timberjack 1270 D, 2 - Valmet 911.3, 3 - Амкодор 2551

Аналізуючи отриманий результат, зазначимо, що ухил лісосіки α та напрям руху β з одночасним виконання виробничої функції харвестера, суттєво впливають на опорні реакції ґрунту на рушій, які можуть у декілька разів перевищувати такі ж величини під час статичного положення механізму на горизонтальній площині у складеному положенні. Зрозумілим є те, що на величину найбільшої реакції впливає асиметричне навантаження від головки харвестера із затисненим стовбуром з плечем, рівним розкладеному маніпулятору. Представлений на рис. 3 розв'язок задачі близький до реального стану в межах зміни кута $\gamma = 20^\circ \div 45^\circ$, оскільки в цьому діапазоні слід очікувати виконання умови $R_6^2 \approx 0$, за якої побудовано розв'язок (14) та отримано достатні для інженерної оцінки силових параметрів рушіїв розв'язки.

Визначення дотичних складових реакцій опорної поверхні виконується в припущенні, що найбільш навантаженим є рушій, над яким розташований маніпулятор з багатоопераційною головкою та захопленням стовбура, розподіл тангенційних реакцій між іншими рушійми є несуттєвим.

$$T_1^0 = 1 + 6 \cdot \frac{M_\omega \cdot \frac{1}{\sin \alpha} + (G_T + G_{CT}) \cdot (L_{M1} + L_{M2}) \cdot \sin(\beta - \gamma)}{a_2 \cdot (G_T + G_{M1} + G_{M2} + G_T + G_{CT})}. \quad (7)$$

Відношення (15) свідчить про те, що величина сумарної тангенційної реакції для рушія під розкладеним та задіяним в операціях виробничої функції є більшим від величини тангенційної реакції для транспортного положення харвестера. У випадку тестового прикладу – харвестера Valmet 911, $a_2 = 1,65 + 1,85 = 3,5\text{ м}$, $M_\omega = 4,05 \cdot 10^4$ Нм. Вирази для повної та відносної тангенційної реакції наберуть вигляду:

$$T_1 = 11600 + (109600 \cdot \sin(\beta - \gamma) + 34400) \cdot \sin \alpha \text{ Н},$$

$$T_1^0 = 1 + \frac{0,337}{\sin \alpha} + 3,189 \cdot \sin(\beta - \gamma), \quad (8)$$

Графіки їхньої залежності від кута γ для деяких значень ухилу α представлено на рисунку 4. Із аналізу наведених результатів зазначимо, що абсолютні величини дотичних складових реакцій є порівняльними зі значеннями нормальних складових, що вказує на необхідність урахування T_1 під час вибору типорозміру рушіїв для роботи у гірських місцевостях із забезпеченням можливості виконання механізмом операцій виробничої функції. З наведених графіків визначаються умови експлуатації розгляданого тестового механізму без проковзування його рушіїв для конкретного типу ґрунту та ухилу поверхні руху.

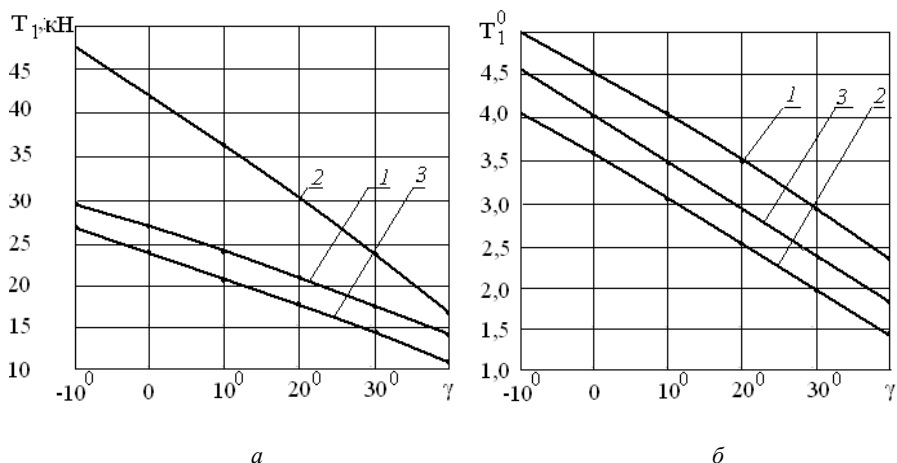


Рисунок 4 – Залежності абсолютної – *а* та відносної – *б* дотичної складової реакції опори першого рушії від кута відхилення стріли-маніпулятора γ від напрямку руху харвестера лісосікою для деяких значень кутів: 1 - $\alpha = 10^0$, $\beta = 30^0$; 2 - $\alpha = 20^0$, $\beta = 30^0$; 3 - $\alpha = 10^0$, $\beta = 20^0$

Відзначимо, що для руху харвестера з одночасним виконанням ним операцій виробничої функції в розгляданих експлуатаційних умовах лісосіки з ухилом, навантаження на рушій суттєво можливо у декілька разів відрізняється від усереднених значень. Певний вплив рушіїв мають і дотичні складові реакції опорної поверхні (грунту), які для розгляданих машин складають 14,5 – 16,5 % від сумарної реакції та викликають 1,1 – 1,8 % довантаження рушіїв у порівнянні із стандартними варіантами руху

Такі дані слід враховувати під час оцінок фактичних ризиків гірської лісозаготівлі, а також у процесі опрацювання експериментальних даних для випадків значної асиметрії навантаження, ухилом поверхні руху та динамічним впливом напілних знарядь на рушії. Експлуатація харвестерів зі стандартним рівнем екологічних ризиків і зменшення рівня пошкоджень у розгляданих умовах викликає необхідність певних обмежень: робота з маніпулятором, що розкривається не на всю довжину, а на певний кут, який можна визначити за використання пропонованого підходу; обмеження потужності повороту та підймання стріли - маніпулятора із затисненим стовбуром тощо.

Результати теоретичних розрахунків можна уточнювати під час експлуатаційних випробувань харвестерів різних форм із внесенням таких результатів у відповідні технічні регламенти для забезпечення належного рівня промислової безпеки та охорони праці робітників галузі. Проведення такого типу експлуатаційних випробувань доцільно реалізувати на спеціалізованому ваговому та стендовому обладнанні УкрНДІПВТ (сmt.

Магерів Львівської обл.), представлено на рисунку 5.

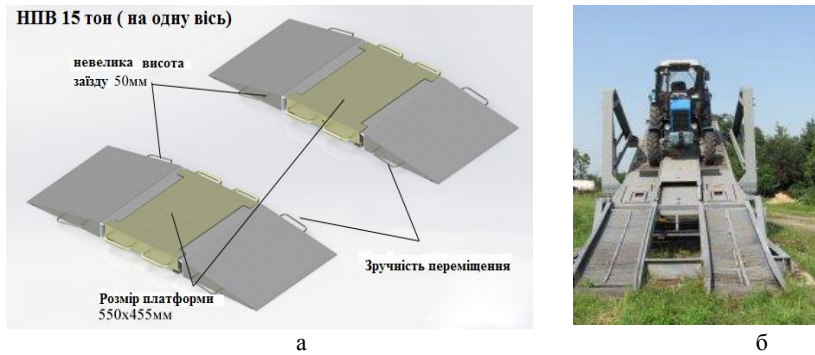


Рисунок 5 – Вагове та стендове обладнання Львівської філії УкрНДПВТ

Пропонується [7] схема механізму з тросом щоб запобігти перекиданню – рисунок 6. Під час проведення дослідів слід огорожувати майданчик від проникнення сторонніх осіб.

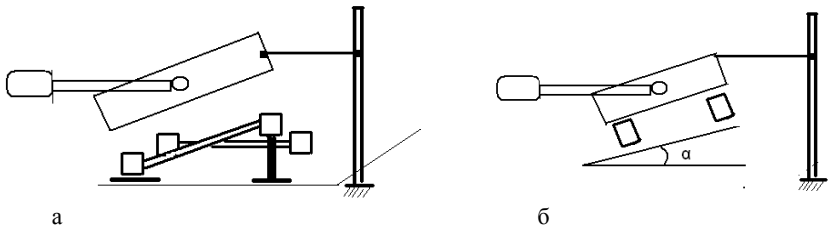


Рисунок 6 – Кріплення страхувального троса у випробуваннях стійкості механізму під час наїзду на перешкоду (а) та перекидання (б)

Висновки. Отримано аналітичні вирази тягових характеристик і опорних реакцій харвестера, який рухається гірською лісосікою та одночасно виконує операції технологічної функції. Ці вирази побудовано залежно від геометричних та силових параметрів розгляданого механізму та умов його експлуатації. Встановлено, що ухил лісосіки, напрям руху механізму та положення робочого органу суттєвим чином впливають на тягові характеристики машини загалом та величину опорних реакцій окремих рушіїв, що може призвести до втрати стійкості механізму на ухилі.

Визначено підходи і засоби спеціалізованої програми випробувань харвестера на територіях з ухилом. Представлені результати можуть бути практично реалізовані під час випробувань відповідної лісової техніки в умовах Львівської філії УкрНДПВТ ім. Л.Погорілого.

Література

1. Статистичний збірник "Регіони України". Ч. I – II / Київ.- 2006.
2. Библюк, Н. І. Лісозаготівельні комбайни: особливості конструкції, функційні схеми, перспективи / Н. І. Библюк, О. С. Мачуга // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия Машиностроение. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2009. – вип. 55. - С. 235 – 241.
3. Стиранівський, О. А. Моделювання транспортного освоєння гірського лісового масиву з врахуванням потенційних екологічних ризиків / О. А. Стиранівський // Праці ЛАНУ. - 2004. - Вип. 3. - С. 133 - 138.
4. Мачуга, О. С. Особливості проектування лісозаготівельної техніки для роботи на територіях з ухилом. Частина 1. Математична модель / О. С. Мачуга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №6 (1049). – С. 130-144.
5. Библюк Н. І. Лісотransпортні засоби:теорія:підручник / Н. І. Библюк. - Львів: Видавничий дім «Панорама», 2004 . – 453 с.
6. Мачуга, О. С. Особливості проектування лісозаготівельної техніки для роботи на територіях з ухилом. Частина 2. Розв'язування практичних задач та використання результатів / О.С. Мачуга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №18 (1061). – С. 94 - 109.
7. Кузняк, В. Й. Особливості програми експлуатаційних випробувань лісової техніки, що плануються до експлуатації у гірській місцевості: Умови безпеки / В. Й. Кузняк, О. С. Мачуга // Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів (Львів – 2017): [в 2 частинах]. Ч.2. – Львів: ЛДУ БЖД, 2017. – С. 129 – 131.

Аннотация.

Експлуатация современной лесной техники, предназначенной для территорий с уклоном, требует определения границ допустимости эксплуатации. Это обусловлено наличием асимметрично расположенного рабочего органа – стрелы (манипулятора со срезанным стволом дерева), а также выполнением технологических операций в процессе движения механизма восходящей линией лесосеки с уклоном.

Представлены теоретические результаты по определению тяговых характеристик и опорных реакций таких самоходных лесных машин, представлены графические зависимости таких характеристик от параметров машин и условий их эксплуатации. Определены условия безопасной работы харвестеров. Означены средства для проведения лабораторных и стендовых испытаний рассматриваемой лесной техники относительно лесосек с уклоном, в частности - условия устойчивости.

Summary.

Exploitation of modern forestry equipment, which is intended for areas with a slope, needs to determine the limits of permissible operation. This is due to the presence of an asymmetrically located working body – beam (manipulator with a cut tree) and the implementation of technological operations in the process of moving uphill line of the felling area with a slope.

The theoretical results concerning determination of traction characteristics and reference reactions of such self-propelled forest machines are presented, graphic dependences of such characteristics on the parameters of machines and conditions of their operation are given. Conditions of safe work of harvesters are determined. The means for laboratory and bench testing of the considered forest technology concerning the slope with the slope, in particular stability conditions, are outlined.